

Tecniche di simulazione dell'entità del reflusso sanguigno da valvole cardiache incontinenti

P.L. Miglioli

CILEA, Segrate

Abstract

In questo articolo viene presentata l'attività di ricerca in corso nell'ambito della collaborazione tra CILEA e l'Istituto di Fisica e Terapia Medica dell'Università di Pavia. Si descrivono brevemente la problematica clinica affrontata e i metodi di simulazione numerica adottati per l'indagine dei fenomeni fluidomeccanici in questione, secondo la metodologia proposta dal prof. Franco Recusani cardiologo e ricercatore presso il suddetto Istituto, e dal prof. Mario Gallati, Direttore del Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Ambientale dell'Università di Pavia.

Il problema

Nel campo dei metodi diagnostici in cardiologia sta acquisendo rilevanza sempre maggiore l'esigenza di determinare quantitativamente l'entità del reflusso sanguigno da valvole mitrali incontinenti. In condizioni patologiche il cuore può presentare lesioni o alterazioni della valvola mitralica tali per cui nella fase di sistole parte del sangue viene rigurgitata dal ventricolo sinistro nell'atrio e il flusso sanguigno verso l'aorta risulta alterato rispetto alle condizioni normali. L'orificio rigurgitante può essere di dimensioni più o meno accentuate; nei casi più gravi l'unica soluzione possibile al problema consiste nell'intervento chirurgico. La capacità di valutazione, per mezzo di strumenti diagnostici di largo impiego, delle dimensioni della lesione valvolare permetterebbe di definire correttamente la gravità del problema, aiutando il medico nella scelta della terapia adeguata cui sottoporre il paziente.

Una via utile per tale valutazione può essere la determinazione della portata del getto rigurgitante; in particolare la misura della velocità del sangue nella zona del rigurgito potrebbe, insieme alla valutazione della portata sanguigna nell'aorta, fornire le informazioni necessarie per stimare le dimensioni dell'orificio rigurgitante. Lo strumento fondamentale per misurare la velocità del sangue nel sistema cardiovascolare

è il velocimetro doppler continuo, di uso comune come mezzo diagnostico; una tecnica che, utilizzando tale strumento, permettesse di quantificare la gravità della lesione valvolare sarebbe di estremo interesse clinico.

La prospettiva attuale

L'attività di ricerca nel campo applicativo in questione, che coinvolge molti enti e laboratori in tutto il mondo, è stata rivolta, inizialmente, alla valutazione della portata sanguigna di rigurgito partendo da misure, mediante tecniche doppler continuo, della velocità del sangue in corrispondenza del getto nella zona atriale (fig. 1).

I risultati ottenuti con tale prospettiva non permettono una valutazione accurata della portata rigurgitante a causa di due fattori:

- la turbolenza del getto
- le caratteristiche geometriche dell'atrio

D'altro canto, come si vede in fig. 1, le immagini a colori generate dal doppler evidenziano, nella regione a monte dell'orificio verso il ventricolo, zone quasi emisferiche in cui si hanno valori di velocità costanti.

In generale, in presenza di orifici rigurgitanti, si osserva comunemente una regione di accelera-

zione del flusso sanguigno nel ventricolo sinistro in corrispondenza dell'orificio; in essa il moto si può considerare laminare e irrotazionale.

Alla luce di tali considerazioni si è deciso di indagare approfonditamente la possibilità di fornire valutazioni quantitative del fenomeno di rigurgito proprio basandosi su misure di velocità nella regione di accelerazione e di convergenza del flusso, e non nella zona del getto turbolento a valle dell'orificio.

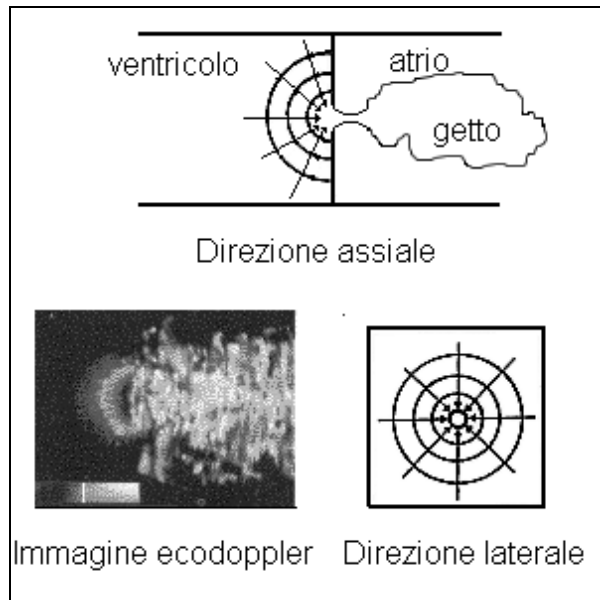


Fig. 1 - caratteristiche del fenomeno

Il caso ideale

Consideriamo il caso ideale di un orificio puntiforme su una lastra piana senza confinamento laterale, e le caratteristiche del moto di un fluido newtoniano nei dintorni della sorgente.

Dalle basi teoriche della meccanica dei fluidi, in particolare dal teorema di Bernoulli, è noto che il moto è caratterizzato da linee di flusso ordinate con velocità che cresce linearmente avvicinandosi all'orificio; inoltre il fluido si conforma in superfici di isovelocità emisferiche centrate all'orificio. In accordo con il principio di continuità, la portata che attraversa ogni isosuperficie emisferica è anche la portata uscente dall'orificio.

Il considerare la zona di accelerazione e convergenza a monte dell'apertura, invece che la re-

gione atriale interessata dal getto di rigurgito, implica, quindi, due vantaggi:

- il moto è laminare e irrotazionale per cui le misure di velocità risultano più precise
- valutando dalle immagini doppler le dimensioni delle isosuperfici sferiche, e quindi l'area attraversata dal flusso, e conoscendo la velocità in ogni punto, per il principio di continuità è possibile quantificare la portata uscente dall'orificio.

Le verifiche

Per verificare la bontà dell'ipotesi emisferica è stata condotta una serie di misure in laboratorio su un modello idraulico in scala del sistema ventricolo-atrio-aorta.

In particolare, per una serie di diametri dell'orificio corrispondenti a valori che sono rilevanti dal punto di vista clinico (5, 7, 9, 11 mm) e per una serie di portate aortiche (0, 10, 20, 30 litri/min) sono state effettuate le misure della velocità del fluido lungo la linea centrata nell'orificio e in direzione normale alla sezione d'uscita.

Sulla base dell'ipotesi emisferica sono state quindi calcolate, risolvendo analiticamente le relative equazioni, le portate uscenti dalla regione emisferica data la portata del sangue in aorta, e sono stati eseguiti i confronti con i valori misurati nel modello in scala.

L'esito di tali confronti ha evidenziato la sovrastima delle velocità calcolate rispetto a quelle misurate. Essendo l'entità di tale sovrastima piuttosto consistente (1.5 -3 volte), si ritiene che l'ipotesi emisferica debba essere considerata alla luce dei seguenti fatti:

- l'effetto di contenimento delle pareti del ventricolo sinistro
- la contemporanea presenza del flusso aortico durante la fase di sistole.

L'approccio numerico

Non essendo praticabile la soluzione per via analitica delle equazioni del moto in presenza degli effetti precedentemente indicati, e a causa della complessità geometrica della regione in questione, si è deciso di effettuare una serie di simulazioni mediante tecniche di tipo numerico che replicassero le misure di laboratorio effet-

tuate sul modello in scala; la soluzione delle equazioni del moto in regioni dalla geometria complessa è adeguatamente affrontabile mediante strumenti software, pur richiedendo notevoli risorse di calcolo. In particolare esistono diversi pacchetti applicativi commerciali che integrano le equazioni generali della meccanica dei fluidi tramite il metodo degli elementi finiti, mediante il quale è possibile considerare regioni dalla geometria anche alquanto complessa, come nei casi qui illustrati.

Gli obiettivi

Come accennato precedentemente l'obiettivo principale della attività di ricerca qui brevemente presentata consiste nella verifica della validità dell'approccio numerico nella definizione delle caratteristiche fondamentali del campo di moto in prossimità dell'orificio rigurgitante. Una volta stabilita la affidabilità delle simulazioni numeriche, si potrebbe effettuare una serie di calcoli relativamente ad orifici di forma e dimensioni rilevanti dal punto di vista patologico, generando un atlante di possibili casi clinici; a questo punto, tramite la sola conoscenza del valore massimo di velocità di reflusso e della sua distribuzione nella zona di interesse, si potrebbero, confrontando le misure con i risultati numerici disponibili, fornire valutazioni sufficientemente accurate dell'entità del reflusso sanguigno dalla valvola mitralica.

I risultati

In questo paragrafo consideriamo uno dei risultati della simulazione numerica effettuata, descrivendone l'interpretazione; in appendice vengono presentati in forma grafica, tutti i risultati di tutte le simulazioni.

In fig. 2 viene mostrato l'andamento della componente di velocità in direzione normale alla sezione di uscita corrispondente all'orificio rigurgitante, in funzione della distanza dall'orificio stesso. Il grafico mostra il confronto tra le misure sperimentali e i risultati numerici relativi alla simulazione per un orificio piano di 5 millimetri di diametro e portata aortica di zero litri al minuto. Il grafico presenta sia le misure che i risultati numerici in forma normalizzata, sulle ascisse al diametro dell'orificio, sulle ordinate alla velocità massima misurata al centro dell'orificio in direzione normale alla sezione d'uscita.

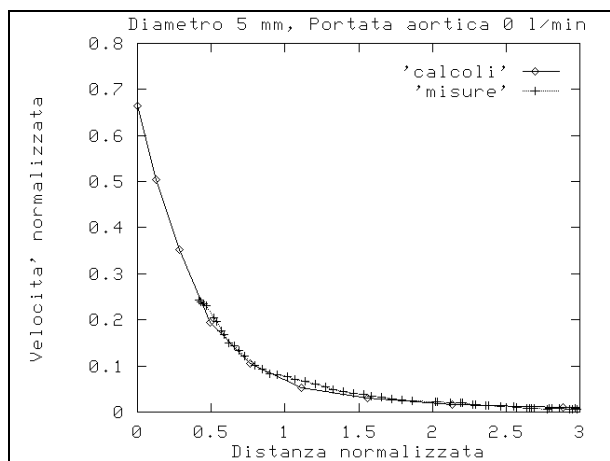


Fig. 2 - diametro 5 mm

Il buon accordo tra misure di laboratorio e risultato numerico si ottiene anche in tutti i casi presi in considerazione, tranne il caso 11 mm con 30 l/min di portata aortica in cui si ha una sovrastima del calcolo rispetto alle misure.

Conclusioni

La qualità dei risultati sin qui ottenuti mostra la affidabilità della tecnica numerica adottata; le tecniche di simulazione numerica di fenomeni fluidodinamici possono quindi contribuire in maniera notevole alla valutazione quantitativa dell'entità del rigurgito da valvole cardiache incontinenti e, in prospettiva, potrebbero risultare utili nel trattamento clinico di pazienti affetti da tali patologie.

Nei futuri sviluppi della attività di ricerca si intende estendere l'analisi ai casi di orifici non più piani, come nella situazione attuale, ma anche geometricamente più complicati, in accordo con le osservazioni cliniche e patologiche disponibili.

Per far ciò sarà necessario condurre una nuova serie di misure sia in vivo che in vitro.

Le simulazioni numeriche qui brevemente descritte sono state effettuate sulla macchina Exemplar SPP 1200 del Cilea, utilizzando il programma FIDAP, che risolve le equazioni del moto di un fluido incompressibile mediante metodi di integrazione agli elementi finiti.

Pur essendo la versione del prodotto utilizzata di tipo sequenziale e non parallelo, quindi pur non sfruttando appieno le potenzialità del sistema di calcolo SPP 1200, è risultato indispensabile poter disporre di esso, date le grandi di-

mensioni di memoria di massa e di memoria centrale necessarie per l'ottenimento dei risultati in tempi sufficientemente rapidi.

Nel prosieguo dell'attività di ricerca si intende valutare la possibilità di utilizzare un codice di calcolo parallelo, in considerazione soprattutto del fatto che nei nuovi casi da analizzare si dovranno affrontare geometrie più complesse ed articolate di quella considerata finora; di conseguenza si dovrà utilizzare un maggior numero di elementi per la discretizzazione del dominio di calcolo, aumentando le necessità di risorse adatte a minimizzare il time-to-solution.

Appendice

Risultati delle varie simulazioni effettuate.

